

Über die Bedeutung des Hoftüpfelverschlusses für die axiale Wasserleitfähigkeit von Nadelhölzern

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

der

Hohen Naturwissenschaftlichen Fakultät

der

Ludwig-Maximilians-Universität

zu München

Vorgelegt

von

Walter M. Merz

aus

Wernersreuth/Kreis Asch

Januar 1958

Berichterstatter:

1. Prof. Dr. B. Huber

2. Prof. Dr. L. Brauner

Tag der mündlichen Prüfung: 21. 5. 1958

Meinen lieben Eltern
in tiefer Dankbarkeit
gewidmet

Sonderdruck aus
Planta, Bd. 51, Heft 5, S. 645—672 (1958)
Springer-Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg

Aus dem Forstbotanischen Institut München

ÜBER DIE BEDEUTUNG DES HOFTÜPFELVERSCHLUSSES
FÜR DIE AXIALE WASSERLEITFÄHIGKEIT
VON NADELHÖLZERN*

I. Mitteilung
GRUNDERSCHENUNGEN

Von
BRUNO HUBER und WALTER MERZ**

Mit 6 Textabbildungen
(Eingegangen am 20. März 1958)

Einleitung

Im Vergleich zur Permeabilität des Protoplasmas, mit der sich viele Tausende von Arbeiten beschäftigen, ist die Durchlässigkeit der Zellwand verhältnismäßig wenig erforscht (vergleiche die letzte Sammeldarstellung von BRAUNER im „Handbuch der Pflanzenphysiologie“, 1956). Zumal in der Tränktechnik des Holzschutzes überwiegen rein empirische und handwerkliche Untersuchungen. Um die theoretischen Grundlagen der Tränktechnik zu klären, regte der erste Verf. seine letzte Tharandter Doktorandin, Frau U. HARTMANN-DICK, an, die Durchlässigkeit des Holzes gegenüber verschiedenen Lösungsmitteln und gelösten Stoffen, in Anlehnung an die Erfahrungen der Protoplasmatik, in möglichst einfachen Modellversuchen zu prüfen. Sie wählte hierfür die *radiale* Durchlässigkeit 2—3 mm starker Scheibchen von 20 mm Durchmesser, durch welche die Lösungen unter 2 atm Druck gepreßt wurden. Sie fand u. a. Unterschiede von mehreren Zehnerpotenzen in der Durchlässigkeit von Splint- und Kernholz und eine deutliche Beeinflußbarkeit der Durchlässigkeit durch Ionen (lyotrope Reihe) und organische Lösungsmittel.

Es schien wünschenswert, die Erfahrungen von HARTMANN-DICK durch Versuche über die *axiale* Durchlässigkeit zu ergänzen, nicht nur, weil axiale Tränkverfahren (Saftverdrängungsverfahren, Lebendtränkung) neben radialen eine beträchtliche Rolle spielen (MAHLKE, TROSCHEL u. LIESE 1950), sondern vor allem, weil es sich dabei um den normalen Weg des natürlichen Saftstromes handelt, von solchen Untersuchungen also auch neue Einblicke in die Physiologie des Transpirationsstromes zu erwarten waren. Nach Vorversuchen im Rahmen einer Zulassungsarbeit zur Prüfung für das Höhere Lehramt (INGE SCHMIDT 1954)

* Herrn Prof. Dr. O. RENNER zum 75. Geburtstag gewidmet.

** I. Teil einer Dissertation der Naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität München.



übernahm der zweite Verf. im Rahmen des Schwerpunktprogramms „Holzforschung“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft diese dankbare Aufgabe.

Die Untersuchungen liefen insofern anders als geplant, als sich bei Nadelhölzern die als Bezugssystem vorgesehene *Wasserleitfähigkeit* als *überaus variabel* erwies. Die Ursache für die zunächst schlechte Reproduzierbarkeit der Werte konnte im Verhalten der Hoftüpfel gefunden werden, deren Verschluß — anatomisch oft beschrieben — bisher physiologisch kaum faßbar war. Die hier vorgelegten Untersuchungen konzentrieren sich ganz auf die Klärung dieses Zusammenhanges. Erst damit scheinen die Voraussetzungen für die Erfassung von Durchlässigkeitsunterschieden gegenüber verschiedenen Lösungsmitteln und gelösten Stoffen geschaffen, mit denen sich weitere Mitteilungen beschäftigen sollen.

Für die jahrelange Unterstützung der Untersuchungen sei der Deutschen Forschungsgemeinschaft geziemend gedankt.

A. Vorversuche und Versuchsanordnung

1. Prüfkörper

a) Allgemeines. Die Technologie des Holzes (KOLLMANN 1951, 1955) verdankt ihre entscheidenden Fortschritte zweifellos der „*Prüfkörper-Methode*“: An sorgfältig gewählten Ausschnitten kleinerer Abmessungen lassen sich Festigkeitseigenschaften aller Art, Pilz- und Insektenresistenz und dergleichen in vielfältiger Wiederholung leichter prüfen als an ganzen Baumstämmen. Ebenso bewährt hat sich die Prüfkörpermethode bei Versuchen über die Rindenschälung (HUBER 1948, WILCOX u. Mitarbeiter 1954, GLÄSER 1954, ZIEGER u. SACHSSE 1955).

Auch bei den vorliegenden Untersuchungen bedienen wir uns der Prüfkörpermethode: Während HARTMANN-DICK, wie eingangs erwähnt, die *radiale* Durchlässigkeit an genormten Scheibchen prüfte, ging bereits INGE SCHMIDT (1954) zur Verwendung meist 4 cm langer *axialer* Prüfylinder über, eine Anordnung, die im wesentlichen auch bei den vorliegenden Untersuchungen beibehalten wurde. Für Vorversuche wurden Stücke von dünnen Stämmchen und Ästen verwendet. Diese Methodik konnte aber nicht gut beibehalten werden, da es Mühe machte, Proben stark wechselnder Durchmesser an die noch zu besprechende Apparatur anzuschließen.

Zur Vereinheitlichung der Proben wurden diese daher aus Stammscheiben in der gewünschten Form herausgeschnitten. Die zylindrischen Proben von 15 mm Durchmesser wurden mit einem Hohlbohrer möglichst faserrecht entnommen¹. Die Proben waren in der Regel 40 mm, später nach Einsatz eines neuen Bohrers zum Teil auch 80 mm lang. Die

¹ Für die Anfertigung der zahlreichen Proben möchten wir dem Oberpräparator des Forstbotanischen Institutes, Herrn J. HEY, auch an dieser Stelle danken.

längeren Proben wurden aber nur ausnahmsweise als solche verwendet, in der Regel hingegen quer halbiert, um zwei streng vergleichbare Prüfcylinder (von je 40 mm Länge) zu erhalten. Da solche Proben naturgemäß mehrere Jahresringe umfassen, wurden für Sonderfragen Zylinder kleinerer Abmessungen gedreht, welche nur Früh- oder nur Spätholz enthielten (vergleiche die folgende II. Mitteilung, HUBER u. MERZ 1958).

b) Aufbewahrung der Proben. Um die möglichst frisch entnommenen Holzproben auf eine gleichmäßige Anfangsfeuchtigkeit zu bringen, wurden sie in Gefäßen mit destilliertem Wasser unter Vakuumglocken gesetzt, und diese abwechselnd dem Vakuum einer Wasserstrahlpumpe und dem normalen Luftdruck ausgesetzt. Dies wurde so lange fortgesetzt, bis alle Proben auch im Vakuum am Boden der Gefäße liegenblieben. Das ist bei Holz der hier verwendeten Rohwichten der Fall, wenn weitgehende Fasersättigung und Füllung aller Zellhohlräume mit Wasser erreicht ist.

Nun konnte aber nicht für jeden einzelnen Versuch jedes Probeklötzchen frisch hergestellt werden, sondern es mußte stets eine größere Zahl von Proben gleichzeitig angefertigt und bis zur Verwendung in geeigneter Weise vorrätig gehalten werden. Um eine Verpilzung einerseits und eine chemische Veränderung der Proben andererseits zu vermeiden, wurden die Holzklötzchen in großen Standgläsern mit destilliertem Wasser aufbewahrt und reichlich Kristalle von *Thymol* in das Gefäß gegeben. Dadurch wurde die Atmosphäre in den gut verschlossenen Gläsern mit Thymoldämpfen gesättigt, ohne daß das kaum wasserlösliche Thymol die Proben selbst beeinflußt hätte (wie das bei den von HARTMANN-DICK und I. SCHMIDT verwendeten Formaldehydlösungen wahrscheinlich der Fall war). Durch die Thymol-Zugabe konnte bei allen Nadelholzproben eine Verpilzung verhindert werden¹. Auch bei 50—90° „eingeweckte“ Proben hielten sich jahrelang einwandfrei. Um die bei diesen hohen Temperaturen etwa möglichen Veränderungen der Holzproben durch Quellungsvorgänge zu vermeiden, verdient auch das von HARRIS (1954) angegebene Verfahren der feuchten Aufbewahrung der Holzproben bei 1—2° Beachtung.

2. Orientierende Durchsaugversuche mit Farbstofflösungen

Privatdozent Dr. ZIEGLER hatte 1956 in unserm Institut zur Gewinnung von Gefäßsaft im Rahmen seiner Habilitationsschrift eine Versuchsanordnung entwickelt, die auch wir für Vorversuche verwenden konnten: Die zylindrischen Holzproben wurden in mehrere Schlauchstückchen so dicht eingesetzt, daß das Ganze als Stopfen auf eine Saugflasche aufgesetzt werden konnte; während dann die Saugflasche durch eine Wasserstrahlpumpe evakuiert wurde, konnte man der Holzprobe von oben Farbstofflösung zuführen.

Diese Versuchsanordnung gab für die weitere Arbeit wertvolle Aufschlüsse über die Filtrationswege. Zum Beispiel beschränkte sich bei Robinie in den älteren Jahresringen die Leitung auf das Spätholz, weil das Frühholz bereits von Thyllen verschlossen war; bei Lärche hört an der Splint-/Kerngrenze die Farbstoff-Filtration unvermittelt auf; im Splintholz der Nadelhölzer farbte sich stets stark bevorzugt das Frühholz, welches bei Kurzversuchen allein gefärbt wurde; bei Schrägfaserigkeit ergaben nur die durchlaufenden Bahnen eine Filtration der Farbstofflösung, während blind endende Bahnen nicht infiltriert wurden. Besonders bei Buchenholz betrug aus diesem Grunde der wirklich leitende Querschnitt oft nur

¹ Nur die Proben von Robinie, Esche und Waldrebe (*Clematis*) verpilzten auch bei Thymol-Zugabe und konnten nicht auf diese Weise für die Versuche aufbewahrt werden.

50—70% des gesamten. Bei der Berechnung absoluter Filtrationswerte müßte man diesem Umstande Rechnung tragen; wir haben es aber bei den Hauptversuchen vorgezogen, auf eine rechnerische Korrektur zu verzichten und schrägfaserige Proben von der Auswertung auszuschließen. Zu diesem Zwecke wurden jeweils nach Abschluß der nunmehr zu schildernden Druckversuche durch die Holzproben mit Hilfe der beschriebenen Versuchsanordnung Farbstofflösungen zur Markierung der benützten Bahnen durchgesogen.

3. Endgültige Versuchsanordnung (Druckversuche)

Bei den beschriebenen Durchsaugversuchen hätten sich fortlaufende quantitative Messungen ziemlich schwierig gestaltet; deshalb wurde bei den endgültigen Versuchen vorwiegend destilliertes Wasser *unter Druck* durch die Prüfkörper filtriert und die ablaufende Menge volumetrisch bestimmt.

Für Absolutmessungen empfiehlt es sich, während der Filtrationsdauer den *Druck konstant* zu halten. Am besten benützt man dafür Abklärflaschen, deren großer Flüssigkeitsspiegel während eines Versuches nur unbedeutend sinkt. Die *Druckhöhe* wurde zwischen 0 und 10 Meter Wasserdruck variiert, was bei 4 cm Probenlänge Druckgefällen bis zu 25 atm/m entspricht. Bei den höchsten Drucken stand das Vorratsgefäß im Dachgeschoß des Institutes, während die Prüfkörper im Erdgeschoß an die durch das Treppenhaus geführten Schlauchleitungen angeschlossen waren.

Schwieriger ist die Einhaltung *konstanter niedriger Drucke*, wie sie die im Abschnitt B 3 behandelten Fragen verlangen. Dazu wurde das Prinzip der Mariotteschen Flasche angewendet (Abb. 1). Die Druckhöhe ist dabei stets über der unteren Schnittfläche der Holzprobe zu rechnen, was zahlenmäßig natürlich nur bei den kleinsten Drucken ins Gewicht fällt. Druckgefälle unter 0,1 atm/m können überhaupt nicht bei senkrechter, sondern nur bei schiefer bis waagerechter Stellung der Prüfkörper hergestellt werden (vergleiche Abschnitt B 3).

Zur *Abdichtung der Proben* bewährte sich ein ziemlich dickwandiger Polyvinylchlorid-Schlauch. Dieses neuartige Material kann durch Eintauchen in sehr heißes Wasser schmiegsam gemacht werden. In diesem Zustand wird die Holzprobe in den Schlauch eingesetzt. In noch warmem Zustand schmiegt sich das Plastikmaterial gut an die kleinen Unebenheiten der Holzprobe an und bietet im abgekühlten Zustand einen festen Abschluß. Dazu kommt noch der große Vorteil, daß dieses Material glasklar durchsichtig ist, und damit während der ganzen Versuchsdauer einen Einblick in die unmittelbar oberhalb der Probe befindliche Flüssigkeitskammer bietet.

Das ist besonders wichtig zur Überwachung der *Luftfreiheit* des Systems. Aus dem gesamten Glasrohr- und Schlauchsystem muß alle Luft sorgfältig entfernt werden, da sonst bei allen Versuchen mit Nadelhölzern ein „Luftpolster“ in den obersten Tracheiden das Eindringen der Flüssigkeit verhindert und dadurch die Meßergebnisse beträchtlich stört. Die Entlüftung des ganzen Systems wurde durch Einschalten von Y-Stücken aus Glasrohr in die Schlauchleitungen erreicht (Abb. 1). An den freien Enden dieser Dreiwegstücke waren kurze Gummischläuche befestigt.

Aus diesen kurzen Stutzen konnte bei der Füllung des Schlauchsystems mit Flüssigkeit die Luft entweichen. Sobald aus all diesen Stutzen ebenfals luftfreie Flüssigkeit ausströmte, wurden die Schlauchstücke mit Quetschhähnen verschlossen. Je größere Durchmesser für die Schläuche und Glasröhren gewählt wurden, um so leichter konnte die völlige Luftfreiheit der Apparatur erzielt werden.

Die Bestimmung der durchgelaufenen Flüssigkeitsmengen erfolgte je nach der Filtrationsgeschwindigkeit in untergestellten Meßzylindern (mit kleinen Trichtern) oder in Büretten (Abb. 1).

Zur Berechnung der Filtrations-Geschwindigkeiten wurden die in der Zeiteinheit (Stunde = h) aufgefundenen Flüssigkeitsmengen (cm³) bezogen auf die wirklich leitende Querschnittsfläche der Holzprobe (in cm²). Daraus ergab sich für alle in dieser Arbeit genannten Filtrationsgeschwindigkeiten die Dimension:

$$\frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^2 \times \text{h}} = \text{cm/h}.$$

Alle angewendeten Drucke wurden von Wasserdruckhöhe (cm) umgerechnet in Atmosphären, und diese wurden zu der Länge der Holzprobe (ausgedrückt in Meter) in Beziehung gesetzt. Das ergab für alle angegebenen Drucke die Dimension atm/m.

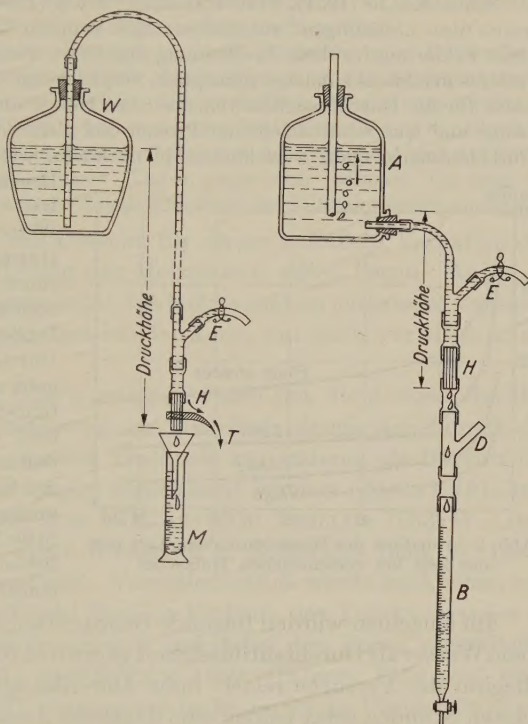


Abb. 1. Schematische Darstellung der beiden Hauptversuchsanordnungen: links für hohe Drucke, rechts für niedrige, sehr konstante Drucke. A Abklärflasche mit „Luftrohr“ = Mariottische Flasche, B Bürette, D Luftdruckausgleichsstutzen für Bürette, E Entlüftungsstutzen mit Gummischlauch und Quetschhahn, H zylindrische Holzprobe, M Meßzylinder mit Trichter, T Tropfenabweiser für evtl. Undichtigkeiten, W Wasserballon mit Heber

B. Hauptversuche

1. Zeitliche Abnahme der Durchlässigkeit

Schon während der Vorversuche fiel auf, daß bei allen Versuchen mit Nadelholz die axiale Durchlässigkeit mit der Zeit ständig abnimmt. Dies konnte weder durch Änderungen des Druckes bedingt sein, weil diese

Erscheinung selbst bei konstantem Druck zu beobachten war, noch konnte es mit der Temperatur zusammenhängen. Die Ursache für diese Erscheinung mußte vielmehr auf einer Veränderung im Holz selbst, während des Filtrationsversuches, beruhen.

Schon KOLJO (1951), Frau HARTMANN-DICK (1954) und INGE SCHMIDT (1954) waren diese „Störungen“ aufgefallen; doch konnten bisher nur Vermutungen, aber keine Erklärung für diese Erscheinung angeführt werden. Diese Art des Versuchsvorganges machte es zunächst unmöglich, vergleichbare und reproduzierbare Absolutwerte für die Durchlässigkeit verschiedener Hölzer anzugeben. Selbst bei gleicher Länge und Querschnittfläche der Proben und gleicher Druckhöhe war nämlich die Durchlaufmenge ganz verschieden, je nachdem, wie lange die Probe schon der

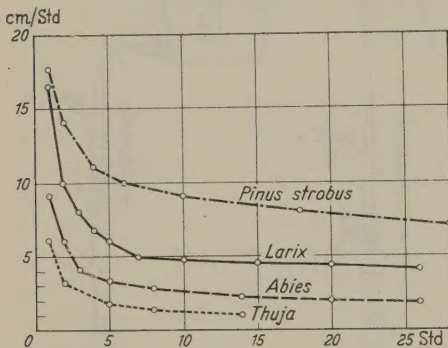


Abb. 2. Abnahme der Wasserdurchlässigkeit mit der Zeit bei verschiedenen Holzarten

Druckfiltration ausgesetzt war. Die überaus große Streuung der Werte in den Ergebnissen von HARTMANN-DICK muß wohl zu einem großen Teil auf dieses Phänomen zurückgeführt werden. Die Proben wurden nämlich, je nach Durchlässigkeit und Dicke, einer ganz unterschiedlich langen Filtrationsdauer (ein bis mehrere Stunden) unterworfen, was bedeutet, daß im ersten Falle nur der Gipfel der Kurve, im zweiten jedoch zum größeren Teil ihr absteigender Ast in die Berechnung der durchschnittlichen Durchlässigkeit pro Zeiteinheit einbezogen wurde.

Im einzelnen wurden folgende Beobachtungen gemacht: Alle mit reinem Wasser als Durchlaufflüssigkeit geprüften Nadelholzproben zeigten zu Beginn der Versuche relativ hohe Durchlässigkeit; schon während der ersten Stunden setzt jedoch eine deutliche Abnahme ein. Diese Abnahme wird zwar mit der Zeit langsamer, ist jedoch durch Wochen weiter zu beobachten (Abb. 2). Erst nach 2–3 Monaten wird ein konstanter Endwert der Durchlässigkeit erreicht. Die dann noch auftretenden geringfügigen Schwankungen folgen den vorhandenen Temperaturschwankungen und lassen sich aus den Viscositätsänderungen des Wassers erklären.

Die Erscheinung war bei allen untersuchten Nadelhölzern in gleicher Weise zu beobachten: bei Lärche, Douglasie, Tanne, Kiefer, Weymouthskiefer und Thuja. Zwar waren qualitative Unterschiede zwischen den einzelnen Holzarten erkennbar, doch verliefen alle Kurven im gleichen Sinne. Die Erscheinung der Abnahme der Filtrationsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Zeitdauer der Druckeinwirkung war auch bei Kernholz zu beobachten; nähere Angaben darüber bringt die II. Mitteilung (HUBER u. MERZ 1958).

Selbstverständlich tauchte schon sehr bald die Frage nach der Ursache dieser Erscheinung auf. Wegen des sehr regelmäßigen Verlaufs der Kurven und den, nach

den ersten Stunden mit fast mathematischer Genauigkeit voraussagbaren weiteren Filtrationswerten, konnte man wohl kaum mit *Verschmutzung* als Ursache für diesen Kurvenverlauf rechnen. Trotzdem wurde hierauf geachtet und sorgfältig geprüft. Die Gefäße für die Tränkflüssigkeiten wurden staubdicht verschlossen, es wurden Filter eingesetzt, und beim Herausnehmen der Proben nach Beendigung des einzelnen Versuches wurde auf eine eventuelle Verschmutzung der Eintrittsflächen geachtet; eine solche konnte jedoch nirgends festgestellt werden.

Man konnte auch an eine *Verstopfung durch Bakterien- oder Pilzwachstum* denken, obwohl auch das wegen des sehr regelmäßigen und stets wiederkehrenden Kurvenverlaufes kaum denkbar erschien. Um auch diese Störung ausschließen zu können, wurden mehrfach dünne Scheiben von den Probeklötzchen an der Oberseite und an der Unterseite abgeschnitten, nachdem sich der typische Abfall der Filtrationsgeschwindigkeit eingestellt hatte. Dabei zeigte sich jedesmal nur eine, der Verkürzung der Holzprobe entsprechende Zunahme der Filtrationsgeschwindigkeit.

Es mußte demnach die Ursache für dieses auffällige Verhalten der Proben in einer Veränderung der Holzproben selbst liegen. Außer an Änderungen im Quellungs Zustand des Holzes und an chemische Veränderungen, die man nicht ganz ausschließen kann, war dabei vor allem an die *Hoftüpfel* zu denken.

In den vorhandenen Literaturangaben sind sich die Autoren darüber einig, daß der Flüssigkeitsstrom im Nadelholz durch das Lumen der Tracheiden geht, und von einer Tracheide zur anderen als Durchtrittspforten die Poren der Hoftüpfel-Schließhaut benützt (BAILEY 1913 und 1916, FRENZEL 1929, JOHNSTON u. MAASS 1930, PHILLIPS 1933, W. LIESE u. FAHNENBROCK 1952, FREY-WYSSLING u. BOSSHARD 1953, W. LIESE u. JOHANN 1954 b, MARTS 1955). Verschiedentlich wurde auch schon vermutet, daß sich die Hoftüpfel-Tori im Verlaufe des Tränkvorganges an einer Seite dem Tüpfelhofe anlegen und dabei den Porus verschließen könnten (RUSSOW 1883, PAPPENHEIM 1889, GRIFFIN 1919 und 1924, KOLJO 1951, BAILEY 1957), wie das auch im Baum bei der Umwandlung von Splint- in Kernholz und bei der Trocknung des geschlagenen Holzes im Splintholz vor sich geht (R. HARTIG 1883, STRASBURGER 1891, HABERLANDT 1924, RENNER 1925, BÜSGEN u. MÜNCH 1927, PHILLIPS 1933, W. LIESE 1951, HARRIS 1954, TRENDLENBURG u. MAYER-WEGELIN 1955, W. LIESE 1956).

Darnach könnte es sich bei der beobachteten Erscheinung um eine *Verlagerung der Tori in den Hoftüpfeln* und damit um einen teilweisen oder vollständigen Verschuß einzelner oder vieler Tüpfel handeln. Durch dauernden einseitigen Druck würden so nach und nach die „Ventilklappen“ der Hoftüpfel in eine Richtung gedrückt und verschlossen. Die folgenden Versuche erbringen den Beweis für diese Annahme.

2. Umkehrversuche zum Nachweis eines reversiblen Hoftüpfelverschlusses

Zur Prüfung dieser Hypothese wurde untersucht, welchen Einfluß eine *Umkehr der Durchflußrichtung* auf die Wasserdurchlässigkeit hat.

Entweder wurden die Probezylinder gedreht und dann wieder dem gleichen Druck unterworfen, oder es wurde einfach der Druck auf der einen Seite aufgehoben, und von der anderen Seite her wurde die gleiche Flüssigkeit in die Holzprobe gedrückt. Beruhte der Rückgang der Wasserleitfähigkeit auf (reversiblen) Hoftüpfelverschluß, so sollten bei Umkehr der Strömungsrichtung die Tori wenigstens zum Teil wieder frei werden und die Leitfähigkeit ansteigen; nach einiger Zeit müßte sich das Spiel in entgegengesetzter Richtung wiederholen, die Tori sich der anderen Ausmündungsöffnung anlegen und die Leitfähigkeit erneut sinken.

Das Ergebnis der Versuche entsprach auf Anhieb und ausnahmslos der Erwartung: *Unmittelbar nach der Umkehr der Durchlaufrichtung stieg*

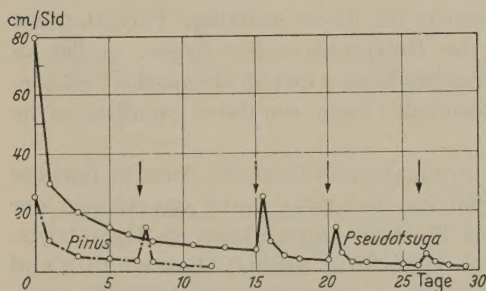


Abb. 3. Zeitlicher Verlauf der absoluten Wasserdurchlässigkeit (cm/h) bei wiederholter Umkehr der Holzproben (Pfeile!)

die Durchlässigkeit auf ein Vielfaches des zuletzt in der ursprünglichen Richtung gefundenen Wertes an (Abb. 3 und 4). Dieser wichtige Befund wurde bereits 1956 in den „Naturwissenschaften“ als „Kurze Originalmitteilung“ veröffentlicht (HUBER u. MERZ).

Der Durchlässigkeitsanstieg nach der Umkehr war um so höher, je kürzer

der Holzzylinder war. Außerdem war der Anstieg der Durchlässigkeit um so höher, je niedriger der angewendete Druck war: Bei Drucken von 0,3—1 atm/m konnte für die ersten Minuten bis zu einer Stunde eine Durchlässigkeit erreicht werden, die 70—100% des Anfangswertes in der ursprünglichen Richtung betrug; bei Drucken von 2—10 atm/m wurden nach der Umkehrung der Durchlaufrichtung am häufigsten 10—50% der Anfangsdurchlässigkeit beobachtet (Abb. 4).

In allen Fällen wurde aber durch die Umkehrung eine eindeutige Steigerung der Durchlässigkeit erzielt, die weit jenseits aller Versuchsfehler lag. Gegenüber dem Endwert der Durchlässigkeit in der anfänglichen Durchlaufrichtung wurden nämlich zu Beginn des Durchlaufes in der Umkehrrichtung durchwegs Steigerungen auf das 2—5fache, häufig aber sogar auf das 10—15fache erzielt. Diese Steigerung war um so geringer, je länger die Holzproben waren.

Daß in den meisten Fällen nicht wieder die volle Durchlässigkeit wie bei den Anfangswerten erreicht wurde, kann man wohl wie folgt deuten: Während sich die Flüssigkeit in der neuen Durchlaufrichtung den Weg durch das Holz bahnt, werden die Hoftüpfel nicht nur von der Wand des Tüpfelhofes weg in die Mittelstellung gerückt, sondern alsbald — und zwar besonders bei hohen Drucken — auf die

andere Seite und dem jenseitigen Porus angedrückt. So entsteht ein neuer Tüpfelverschluß, der den weiteren Durchlässigkeitsanstieg abbremsst. Bei längeren Holzproben wird dieser Vorgang am oberen Ende bereits eintreten, ehe am unteren Ende die letzten ursprünglichen Tüpfelverschlüsse gelöst sind. Bei niedrigen Drucken erfolgt dieser Vorgang des neuerlichen Tüpfelverschlusses so langsam, daß zunächst für einige Minuten bis zu einer Stunde die Durchlässigkeit fast auf den ursprünglichen Wert ansteigt, ehe auch hier durch neuerlichen Verschluß der Tüpfel eine Verlangsamung des Durchlaufes eintritt.

Bemerkenswert ist noch folgende Beobachtungstatsache: Wurde zunächst mit einem hohen Druck ein einseitiger Tüpfelverschluß hervorgerufen, so kann dieser zwar durch einen ebenso hohen oder noch höheren Druck von der Gegenseite, nicht aber durch niedrige Drucke wieder aufgehoben werden. Die Durchlässigkeit steigt in diesen Fällen nach der Umkehrung der Proben nicht an, sondern sinkt im Gegenteil rasch weiter ab und erreicht bald den Wert 0, sofern nach der Umkehrung überhaupt ein Flüssigkeitsaustritt beobachtet werden kann. Ebenso sinkt die Durchlässigkeit sehr stark ab oder erreicht auch hier den Wert 0,

wenn man *ohne* Umkehrung der Holzprobe den Druck etwa von 3 atm/m nach einigen Tagen auf $\frac{1}{5}$ bis $\frac{1}{10}$ dieses Druckes herabsetzt; dagegen ergeben diese Drucke (0,3 bis 0,6 atm/m) noch eine gute Durchlässigkeit, wenn sie von Beginn des Versuches an, also vor dem Eintreten von Hoftüpfelverschlüssen, angewendet werden.

Im allgemeinen haben sich diese beschriebenen *Umkehrversuche* an ein und derselben Holzprobe *mehrmals hintereinander* ausführen lassen. Mit jedem neuerlichen Wechsel der Durchlaufrichtung trat ein neuerlicher Anstieg der Durchlässigkeit ein, welchem jeweils nach einigen Stunden durch neuerlichen Tüpfelverschluß eine Verlangsamung folgte (Abb. 3). Bei den meisten Versuchen wurde dabei ein Nachlassen der Wirksamkeit der Umkehr der Durchlaufrichtung festgestellt. Es kann nicht entschieden werden, ob dies auf eine Art „Erschlaffung“ der Haltefäden der Tori in den Hoftüpfeln zurückzuführen ist, oder ob, als Folge der mehrmaligen Änderungen der Durchflußrichtung, eine gewisse „Verwirrung“ unter den Hoftüpfeln aufgetreten ist, indem zahlreiche Tori entweder auf der einen oder auf der anderen Seite der Tüpfelhöfe „hängen“ geblieben sind.

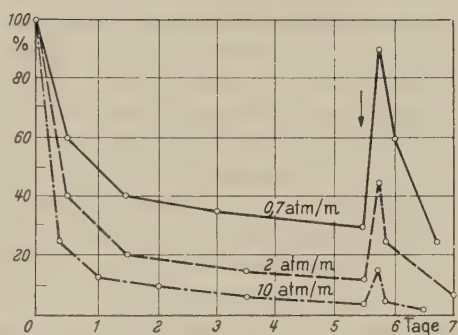


Abb. 4. Zeitlicher Ablauf der relativen Wasserdurchlässigkeit, bezogen auf die Anfangsdurchlässigkeit (= 100 %), für Lärchensplintholz bei verschiedenen Drucken

3. Anatomische Untersuchungen

Zur Prüfung der Richtigkeit der Hypothese, daß durch diese Druckwirkungen eine künstliche Verlagerung der Tori in den Hoftüpfeln herbeigeführt wird, wurden auch anatomische Untersuchungen ausgeführt. Dazu wurden nach den üblichen Methoden tangentielle Längsschnitte durch die Holzzylinder angefertigt, nachdem vorher die Flüssigkeitseintrittsfläche durch eine besondere Kerbe markiert worden war. Im übrigen diente die Methodik von PHILLIPS (1933) und HARRIS (1954) als Vorbild, welche die Stellung der Tori in hunderten bis tausenden von Fällen ausählten. Diese hatten klare Unterschiede festgestellt zwischen Früh- und Spätholz (in letzterem ist der Hoftüpfelverschluß wegen der starren Schließhäute deutlich seltener), zwischen Splint- und Kernholz (letzteres mit praktisch vollständigem Hoftüpfelverschluß), sowie saftfrischem und trockenem Holz (sprunghafte Zunahme der Verschlüsse bei Erreichung des Fasersättigungspunktes).

Außer der Untersuchung ungefärbter Präparate wurden gelegentlich auch *Versuche mit gefärbten Holzschnitten* unternommen. Dabei ergab sich die Zufallsbeobachtung, daß sich die von CARTWRIGHT (1929) zur Differenzierung von Pilzhypen und Holzgewebe angegebene Färbemethode auch für diese Untersuchungen sehr gut eignet. Nach der üblichen Anfärbung mit Safranin erfolgt hier eine Doppelfärbung mit einer Pikrinsäure-Anilinblau-Lösung. Das Anilinblau wird aber nicht nur in Pilzhypen gespeichert und läßt diese deutlich erkennen, sondern es wird auch in den Tori der Hoftüpfel festgehalten und läßt diese daher gegenüber den rotgefärbten Wänden der Tracheiden und damit gegenüber den Tüpfelhöfen deutlich hervortreten.

Bei Stichproben an so gefärbten Präparaten wurde festgestellt, daß die Tori in den Hoftüpfeln der Tracheidenenden tatsächlich durch den Druck in einer Richtung verlagert worden waren. In den Hoftüpfeln der Tracheiden-Längswände dagegen waren die Tori unregelmäßig nach der einen oder anderen Seite verlagert. Wahrscheinlich werden die Tori immer nach jener Tracheide hingezogen werden, in welcher die Flüssigkeit schneller strömt; und Unterschiede in der Durchströmungsgeschwindigkeit benachbarter Tracheiden sind wohl mit Sicherheit anzunehmen.

Die Zurückführung des Durchlässigkeitsrückganges auf Hoftüpfelverschluß ist somit physiologisch und anatomisch gesichert.

4. Abhängigkeit der Filtrationsgeschwindigkeit vom Druck

Die axiale Filtration durch Holz weicht in zweifacher Hinsicht von den einfachen Modellvorstellungen des Hagen-Poiseuilleschen Gesetzes über die Strömung von Flüssigkeiten in Capillaren ab:

1. in der *absoluten* Höhe, weil es sich bei den Gefäßbahnen nicht immer um kreisrunde, glatte Capillaren, sondern oft anders geformte

(polygonale) und innen rauhe (Leisten, Warzen) Röhrensysteme handelt (HARADA 1953, W. LIESE u. HARTMANN-FAHNENBROCK 1953, W. LIESE u. JOHANN 1954a). Die größten Abweichungen aber bringt das Querwandhindernis der Tracheidenhölzer: Während die Wasserleitfähigkeit von Lianen und Wurzelhölzern die nach dem Hagen-Poiseuilleschen Gesetz ermittelte theoretische Leitfähigkeit praktisch erreicht, ergeben sich bei anderen Hölzern empirisch kleinere Leitfähigkeiten bis herab zu wenigen Prozent der theoretischen bei Nadelhölzern (Näheres in der Sammeldarstellung von HUBER im „Handbuch der Pflanzenphysiologie“, 1956a; hier auch die einschlägige Literatur).

2. steigt aber auch die filtrierende Wassermenge beim einzelnen Objekt *mit dem Druck nicht linear*, sondern stärker an, weil mit wachsendem Druck der Capillarwiderstand der engeren Capillaren, welcher zunächst überhaupt keine Flüssigkeit passieren läßt, überwunden wird und für die Strömung zusätzliche Bahnen wegsam werden. Die Theorie dieser Erscheinung haben MANEGOLD u. Mitarbeiter (1940a, b) rechnerisch und empirisch (an künstlichen Membranfiltern) klargestellt. Daß auch im Holz die Filtration mit dem Druck stärker als linear ansteigt, fand PAPPENHEIM bereits 1883; die ausführlichsten Zahlenbelege haben JOHNSTON u. MAASS (1930) auf Grund von Versuchen mit einer modernen Apparatur vorgelegt: bei einer Erhöhung des Druckes auf das Doppelte stieg die Durchlässigkeit unter Umständen auf das 3—5fache an. Ähnliches fand KOLJO (1951), der allerdings nicht den Druck, sondern die Länge der Prüfkörper variierte.

Unsere eigenen Untersuchungen galten nicht so sehr diesen schon länger bekannten Erscheinungen, sondern speziell der *Druckabhängigkeit des Hoftüpfelverschlusses*, insbesondere der Frage, ob es für diesen eine untere Druckschwelle gibt. Das Ergebnis der einschlägigen Versuche mit Lärchensplintholz ist in Abb. 5 im logarithmischen Netz dargestellt, da Druck (Abszisse) wie Filtrationsgeschwindigkeit (Ordinate) über mehr als zwei Zehnerpotenzen schwanken. Bei einer solchen doppelt logarithmischen Darstellungsweise würde eine lineare Beziehung zwischen Druck und Filtration wiederum in einer Geraden zum Ausdruck kommen. In der ersten Versuchsstunde sind die Abweichungen von dieser Proportionalität gering; in Übereinstimmung mit den eingangs erwähnten Arbeiten zeigen die Abweichungen die Tendenz einer überproportional erhöhten Durchlässigkeit bei hohen Drucken.

Würde nun die zeitliche Abnahme der Durchlässigkeit bei allen Drucken gleichmäßig erfolgen, so müßte sich das im doppelt logarithmischen Netz in einer Parallelverschiebung der Durchlässigkeitskurve der ersten Stunde ausdrücken. Tatsächlich aber divergieren die Kurven der 1., 2. und 24. Stunde und des 30. Tages stark nach rechts, d. h. die

Filtration sinkt bei höheren Drucken mit der Zeit nicht nur absolut, sondern auch relativ weit stärker als bei niederen Drucken. Das geht so weit, daß die anfangs gegen die Abszisse leicht konvexen Kurven in einen gegen die Abszisse konkaven Kurvenverlauf übergehen. Während die Filtration anfangs mit dem Druck stärker als linear ansteigt, steigt sie nun schwächer

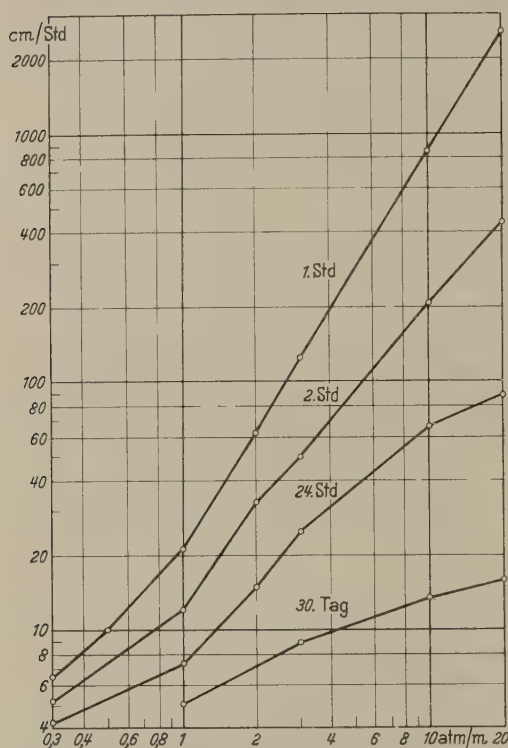


Abb. 5. Abhängigkeit der Wasserdurchlässigkeit von Lärchensplintholz (Ordinate) vom Druck (Abszisse) im doppelt logarithmischen Netz: Mit der Zeit (Parameter) nimmt die Durchlässigkeit bei hohen Drucken rascher ab als bei niederen

als linear. Die Durchlässigkeitsunterschiede zwischen verschiedenen Drucken klingen allmählich ab: Zwischen 1 und 20 atm/m betragen sie in der ersten Stunde 1:125, in der zweiten Stunde 1:37.5, in der 24. Stunde 1:12.7, am 30. Tage aber nur noch 1:3.2.

Darüber hinaus wurden in Abb. 6 die Relativwerte der Durchlässigkeitsabnahme, verglichen mit den Werten der ersten Stunde (= 100 %), zur Darstellung gebracht. Wegen der Erstreckung über mehr als zwei Zehnerpotenzen in beiden Achsen wurde auch hierfür das doppelt logarithmische Netz als Maßstab verwendet, allerdings hier die Zeit als Abszisse und die verschiedenen Drucke als Parameter. Die Abbildung zeigt deutlich die starke Abnahme der Durchlässigkeit (auf weniger als 1 %) im Laufe von 30 Tagen bei Anwen-

dung von 20 atm/m und den viel geringeren Durchlässigkeitsrückgang bei der Anwendung niederer Drucke, besonders unterhalb 1 atm/m.

Das Konvergieren der Kurven nach links in Abb. 5¹ führt schon rein graphisch zur Extrapolation, daß in der Größenordnung von etwa

¹ Eine ähnliche Darstellungsweise hat BOGEN (1950, S. 75, Abb. 3) zur Darstellung des Ultrafilterprinzips bei der Semipermeabilität des Cytoplasmas benützt: Über der Malonamid-Durchlässigkeit als Abszisse konvergieren die Durchlässigkeiten für andere Stoffe in der Richtung steigender Durchlässigkeit, weil die Filterwirkung nachläßt.

0,1 atm/m der zeitliche Rückgang der Durchlässigkeit aufhört. Es ist das offenbar jener Druck, bei dem keine Verlagerung der Tori in den Hoftüpfeln mehr stattfindet. Es ist sicher kein Zufall, daß es sich dabei um die gleiche Größenordnung handelt, mit der der natürliche Saftstrom betrieben wird (HUBER 1956a, b).

Bei der physiologischen Tragweite der Annahme einer *Druckschwelle für den Hoftüpfelverschluß* wollten wir uns nicht mit dieser graphischen Extrapolation begnügen; wir versuchten vielmehr, uns auch empirisch an diese Druckschwelle heranzutasten. Diese Versuche sind deswegen nicht einfach, weil bei so geringen Drucken (0,1–0,5 atm/m) auch nur entsprechend langsame Filtrationen und daher geringe Flüssigkeitsmengen (weniger als 1 ml/h) auftreten, was die Ablesegenauigkeit sehr beeinträchtigt. Zudem sind gerade diese Versuche gegenüber den kleinsten störenden Einflüssen besonders empfindlich. Es werden daher erst noch weitere Untersuchungen zu dieser Problemstellung mit verfeinerten Versuchsanordnungen unternommen. Aus den vorläufigen Messungen kann aber schon erkannt werden, daß bei Anwendung der Drucke von 0,2–0,4 atm/m noch ein geringer

Rückgang der Durchlässigkeit mit der Zeit vorhanden ist, während bei einem Druck von ungefähr 0,1 atm/m keine Änderung der Durchlässigkeit mit den jetzigen Meßgenauigkeiten feststellbar war.

Bei den niedrigsten geprüften Drucken von 0,1 atm/m müssen die Holzproben in horizontaler Lage dem hydrostatischen Druck unterworfen werden, da hier nur je 1 cm Wassersäule pro 1 cm Probenlänge über dem Mittelpunkt der Austrittsfläche als hydrostatischer Druck wirken darf. Diese Versuchsanordnung entspricht damit ungefähr derjenigen des Hartigschen „Tropfenversuchs“ (HARTIG R. 1891, S. 214). Auch das Ergebnis dieser Versuche, daß nämlich Nadelholz selbst bei diesen niedrigen Drucken noch Wasser durchtreten läßt, stimmt mit R. HARTIGs Angaben überein.

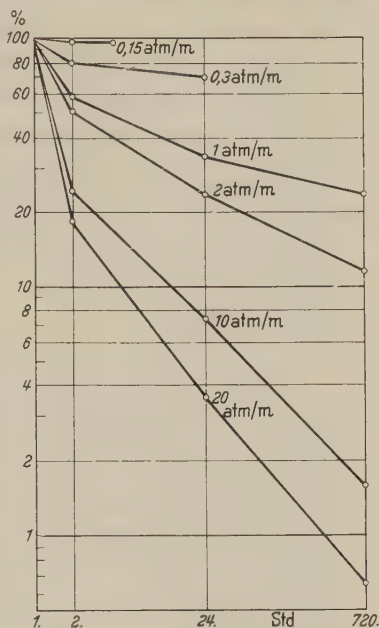


Abb. 6. Zeitliche Abnahme der relativen Wasserdurchlässigkeit von Lärchensplintholz, bezogen auf den Anfangswert (= 100 %) bei verschiedenen Drucken (Parameter)

Zusammenfassung

1. Die axiale Wasserleitfähigkeit von Nadelhölzern wurde an wasser-gesättigten zylindrischen Prüfkörpern (15 mm Durchmesser, 40 mm Länge), welche aus Stammscheiben herausgebohrt wurden, bei Drucken bis zu 1 atm (= 25 atm/m) gemessen (Abschnitt A 1 und 3).

2. Bei Drucken über etwa 0,5 atm/m sinkt die Wasserleitfähigkeit infolge fortschreitenden Hoftüpfelverschlusses stetig bis zu einem Gleichgewicht von etwa 1 bis 2% des Anfangswertes (B 1).

3. Bei Umkehr der Durchströmungsrichtung steigt die Leitfähigkeit, je nach dem Grade des bereits erzielten einseitigen Hoftüpfelverschlusses, schlagartig auf ein Vielfaches an, und sinkt mit der Umlagerung der Tori auf die Gegenseite wieder zum gleichen Endwert (B 2).

4. Die Torus-Verlagerung wird durch hohe Drucke beschleunigt und fehlt bei den Druckgefällen des natürlichen Saftstromes (bei etwa 0,1 atm/m) (B 4).

Literatur

- BAILEY, I. W.: The preservative treatment of wood. II. The structure of the pit membranes in the tracheids of conifers and their relation to the penetration of gases, liquids and finely divided solids into green and seasoned wood. *Forestry Quart.* **11**, 12—20 (1913). — The structure of the bordered pits of conifers and its bearing upon the tension hypothesis of the ascent of sap in plants. *Bot. Gaz.* **62**, 133—142 (1916). — Die Struktur der Tüpfelmembran bei den Tracheiden der Koniferen. *Holz als Roh- u. Werkstoff* **15**, 210—213 (1957). — BOGEN, H. J.: Kritische Untersuchungen über Permeabilitätsreihen. *Planta (Berl.)* **38**, 65—90 (1950). — BRAUNER, L.: Die Permeabilität der Zellwand. In *Handbuch der Pflanzenphysiologie*, Bd. II, S. 337—357. 1956. — BÜSGEN, M.: Bau und Leben unserer Waldbäume, 3. Aufl. neubearb. v. E. MÜNCH. Jena 1927. — CARTWRIGHT, K. ST. G.: A satisfactory method of staining fungal mycelium in wood sections. *Ann. Botany* **43**, 412—413 (1929). — FRENZEL, P.: Über die Porengröße einiger pflanzlicher Zellmembranen. *Planta (Berl.)* **8**, 642—665 (1929). — FREY-WYSSLING, A., u. H. H. BOSSHARD: Über den Feinbau der Schließhäute in den Hoftüpfeln. *Holz als Roh- u. Werkstoff* **11**, 417—420 (1953). — GLÄSER, H.: Die Messung des Schälwiderstandes beim bastfreien Entrinden des Faserholzes. *Holz-Zbl.* **80**, 1131—1132 (1954). — GRIFFIN, G. J.: Bordered pits in Douglas fir: a study of the position of the torus in mountain and lowland specimens in relation to creosote penetration. *J. Forestry* **17**, 813—822 (1919). — Further note on the position of the tori in bordered pits in relation to penetration of preservatives. *J. Forestry* **22**, 82—83 (1924). — HABERLANDT, G.: *Physiologische Pflanzenanatomie*, 6. Aufl. Leipzig 1924. — HARADA, H.: Electron-microscopic investigation on the wart-like (particle) structure of conifer tracheids. *J. Jap. Forestry Soc.* **35**, 393—396 (1953). — HARRIS, J. M.: Heartwood formation in *Pinus radiata* (D. Don.). *New Phytologist* **53**, 517—524 (1954). — HARTIG, R.: Zur Lehre von der Wasserbewegung in transpirierenden Pflanzen. *Unters. forstb. Inst. München* **3**, 47—86 (1883). — *Lehrbuch der Anatomie und Physiologie der Pflanzen*, unter besonderer Berücksichtigung der Forstgewächse. Berlin 1891. — HARTMANN-DICK, U.: Untersuchungen über die Durchlässigkeit des Holzes bei Druckfiltration. I. Durchlässigkeit für Wasser. *Forstwiss. Cbl.* **73**, 40—63 (1954). — II. Durchlässigkeit für Lösungen verschiedener Art. *Forstwiss. Cbl.* **74**, 163—183 (1955). — HUBER, B.:

Physiologie der Rindenschälung bei Fichte und Eiche. Forstwiss. Cbl. **67**, 129—164 (1948). — Die Gefäßleitung. In Handbuch der Pflanzenphysiologie, Bd. III, S. 541—582. 1956a. — Die Saftströme der Pflanzen. Berlin 1956b. — HUBER, B., u. W. MERZ: Über die Wirkung des Hoftüpfelverschlusses auf die Wasserleitfähigkeit von Nadelhölzern. Naturwissenschaften **43**, 114 (1956). — Über die Bedeutung des Hoftüpfelverschlusses für die axiale Wasserleitfähigkeit von Nadelhölzern. II. Vergleichende Untersuchungen und praktische Anwendungen. Planta (Berl.) **52** (1958). — JOHNSTON, H. W., and O. MAASS: Penetration studies. The path of liquid in Jack Pine. Canad. J. Res. **3**, 140—173 (1930). — KOLJO, B.: Über die Mechanik der Flüssigkeitsbewegung bei der Holzimprägnierung. Svenska Träforskn. Inst., Trätekn. Avdel., Medd. B **25** (1951). — KOLLMANN, F.: Technologie des Holzes, 2. Aufl., 2 Bde. Berlin 1951 u. 1955. — LIESE, W.: Über die Eindringung von öligen Schutzmitteln in Fichtenholz. Holz als Roh- u. Werkstoff **9**, 374—378 (1951). — Die Feinstruktur des Holzes und ihr Einfluß auf die Imprägnierung. Holzindustrie **9**, 208—213 (1956). — LIESE, W., u. M. FAHNENBROCK: Elektronenmikroskopische Untersuchungen über den Bau der Hoftüpfel. Holz als Roh- u. Werkstoff **10**, 197—201 (1952). — LIESE, W., u. M. HARTMANN-FAHNENBROCK: Elektronenmikroskopische Untersuchungen über die Hoftüpfel der Nadelhölzer. Biochim. biophys. Acta **11**, 190—198 (1953). — LIESE, W., u. J. JOHANN: Elektronenmikroskopische Beobachtungen über eine besondere Feinstruktur der verholzten Zellwand bei einigen Coniferen. Planta (Berl.) **44**, 269—285 (1954a). — Experimentelle Untersuchungen über die Feinstruktur der Hoftüpfel bei den Koniferen. Naturwissenschaften **41**, 579 (1954b). — MAHLKE, F., E. TROSCHEL u. J. LIESE: Handbuch der Holzkonservierung, 3. Aufl. Berlin 1950. — MANEGOLD, E., S. KOMAGATA u. E. ALBRECHT: Über Kapillarsysteme, XIX/11: Die Kanalzahl-Verteilungskurve für polykapillare Kanalsysteme. (Theoretischer Teil.) Kolloid-Z. **93**, 166—199 (1940b). — MANEGOLD, E., K. SOLF u. E. ALBRECHT: Über Kapillarsysteme, XIX/10: Kapillarer Gegendruck, Kapillarweite und Durchtritt einer Phasengrenzfläche durch Einzelkapillaren und Kapillarsysteme. (Theoretischer Teil.) Kolloid-Z. **91**, 243—275 (1940a). — MARTS, R. O.: Some structural details of Douglasfir pit membranes by phase contrast. Forest Products J. **5**, 381—382 (1955). — PAPPENHEIM, K.: Zur Frage der Verschlößfähigkeit der Hoftüpfel im Splintholz. Ber. dtsch. bot. Ges. **7**, 2—19 (1889). — PHILLIPS, E. W. J.: Movement of the pit membrane in coniferous woods, with special reference to preservative treatment. Forestry **7**, 109—120 (1933). — RENNER, O.: Die Porenweite der Zellhäute und ihre Beziehung zum Saftsteigen. Ber. dtsch. bot. Ges. **43**, 207—211 (1925). — RUSSOW, E.: Zur Kenntnis des Holzes, insonderheit des Coniferenholzes. Bot. Cbl. **13**, 29—40, 60—68, 95—109, 134—144, 166—173 (1883). — SCHMIDT, I.: Über die Durchlässigkeit von Buchenstammholz für Wasser und Elektrolyte. Zulassungsarbeit München 1954. — STRASBURGER, E.: Histologische Beiträge, Heft III: Über den Bau und die Verrichtungen der Leitungsbahnen in den Pflanzen. Jena 1891. — TRENDLENBURG, R.: Das Holz als Rohstoff, 2. Aufl., neubearbeitet von W. MAYER-WEGELIN. München 1955. — WILCOX, H., F. CZABATOR and G. GIROLAMI: Seasonal variations in bark-peeling characteristics of some adirondack pulpwood species. J. Forestry **52**, 338—342 (1954). — ZIEGER, E., u. H. SACHSSE: Messung des Schälwiderstandes. Holz-Zbl. **81**, 1323—1324 (1955). — ZIEGLER, H.: Untersuchungen über die Leitung und Sekretion der Assimilate. Planta (Berl.) **47**, 447—500 (1956).

Prof. Dr. BRUNO HUBER und Dr. WALTER MERZ,
 Forstbotanisches Institut, München 13, Amalienstraße 52

Aus dem Forstbotanischen Institut München

ÜBER DIE BEDEUTUNG DES HOFTÜPFELVERSCHLUSSES
FÜR DIE AXIALE WASSERLEITFÄHIGKEIT
VON NADELHÖLZERN*

II. Mitteilung

VERGLEICHENDE UNTERSUCHUNGEN UND PRAKTISCHE
ANWENDUNGEN

Von

BRUNO HUBER und WALTER MERZ**

Mit 3 Textabbildungen

(Eingegangen am 20. März 1958)

* Herrn Prof. Dr. O. RENNER zum 75. Geburtstag gewidmet.

** II. Teil einer Dissertation der Naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität München.

Einleitung

In der I. Mitteilung hatten die Verff. den zeitlichen Rückgang der axialen Wasserleitfähigkeit von Nadelhölzern und den Wiederanstieg im Umkehrversuch auf reversiblen Hoftüpfelverschluß zurückführen können. In der vorliegenden II. Mitteilung werden diese beiden Effekte bei Splint- und Kernholz, Früh- und Spätholz, Nadel- und Laubhölzern vergleichend weiter untersucht.

Vor allem aber gelang eine Beeinflussung der Vorgänge durch Chemikalien (Alkohol, Netzmittel, Sublimat), was eine praktische Anwendung in der Tränktechnik verspricht.

1. Unterschiede zwischen Splint- und Kernholz

Über Unterschiede zwischen Splint- und Kernholz hat KOLLMANN vor dem Kongreß des Internationalen Verbandes der Forstlichen Forschungsanstalten in Rom (1953) zusammenfassend berichtet. Außerdem hat die Erscheinung der Verkernung in der neuen Auflage von TRENDLENBURGS „Das Holz als Rohstoff“ durch MAYER-WEGELIN (1955) eine umfassende Darstellung gefunden. Unter Hinweis auf diese Arbeiten soll in unserem Zusammenhang nur von den Unterschieden der Wasserdurchlässigkeit die Rede sein.

Schon HARTMANN-DICK (1954) hatte bei ihren Untersuchungen zwischen Splint- und Kernholz in radialer und tangentialer Richtung einen alle Erwartungen übersteigenden Durchlässigkeitsunterschied von 500 : 1 bis 1000 : 1 festgestellt. Nach eigenen Untersuchungen sind die Durchlässigkeitsunterschiede in axialer Richtung noch etwas größer.

HARTMANN-DICK gibt u. a. folgende Werte für die *radiale* Durchlässigkeit von Kiefernholz bei 500 atm/m an (umgerechnet auf cm/h):

Splint 2—4 Kern 0,003—0,006

Bei den eigenen Untersuchungen wurden für Lärchenholz bei einem Druck von 20 atm/m folgende Werte für die *axiale* Durchlässigkeit ermittelt (ebenfalls in cm/h):

Splint 2000—3000 Kern 0,5—2

Da der Hoftüpfelverschluß nach den vorangegangenen Untersuchungen nur einen Rückgang der Durchlässigkeit auf 1—2% bewirkt, muß für die weitere Verschlechterung das zusätzliche mechanische Hindernis micellarer Inkrustationen verantwortlich gemacht werden,

also die Einlagerung sog. *Kernstoffe*, wie sie zuerst in Schweden untersucht wurden (ERDTMAN 1939 a, 1939 b; RENNERFELT 1944). Soweit sich solche besonders in organischen Lösungsmitteln teilweise wieder herauslösen ließen, wurde tatsächlich eine Verbesserung der Durchlässigkeit des Kernholzes beobachtet (W. LIESE 1951 a, HARTMANN-DICK 1954).

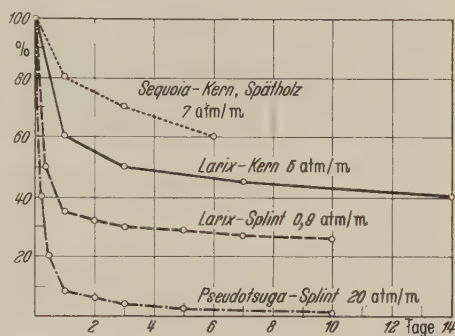


Abb. 1. Abnahme der Wasserdurchlässigkeit, bezogen auf die Anfangsdurchlässigkeit (100%), für verschiedene Splint- und Kernholzproben

Trotz der absolut so geringen Durchlässigkeit wurde merkwürdigerweise auch im Kernholz ein Absinken der Durchlässigkeit während des Versuchs und ein Wiederanstieg beim Umkehrversuch beobachtet. Bei den verwendeten Drucken von 10—50 atm/m sinkt die von Anfang an sehr geringe Durchlässigkeit mit der Zeit allerdings weit weniger schnell und nicht so tief ab wie bei den entsprechenden Splintholzproben (Abb. 1); andererseits erfolgt auch nach dem Umkehrversuch nur ein langsamerer und nicht so hoher Anstieg der Durchlässigkeit.

All das kann vielleicht auf folgende Weise erklärt werden: Im Kernholz sind, bis auf ganz wenige Ausnahmen, alle Tüpfel verschlossen und außerdem mehr oder weniger gut verklebt. Es ist aber immerhin denkbar, daß einige entweder noch frei sind oder unter den angewendeten hohen Drucken frei werden und im Filtrations- und Umkehrversuch reagieren können.

Für die Praxis der Holzimprägnierung ist in vielen Fällen das sichere Erkennen der *Splint-Kern-Grenze* von Bedeutung. Meist handelt es sich darum, festzustellen, ob die angewendeten Imprägniermittel auch wirklich bis an die Grenze des Kernholzes eingebracht wurden. Diese Kerngrenze ist bei Kiefer und Lärche schon durch die Farbe leicht zu erkennen und kann hier außerdem noch durch Reagenzien deutlicher dargestellt werden (KOCH u. KRIEG 1938). Dagegen stehen gerade bei den „Reifholzbäumen“ Fichte und Tanne, wo die Erkennung dieser

Grenze besondere Schwierigkeiten bereitet, bisher keine derartigen Reagenzien zur Verfügung (LIESE J. u. W. 1954).

Auf Grund des geringeren Wassergehaltes im Kern (30—42%) gegenüber dem hohen Wassergehalt des Splintholzes (130—160%) wurde folgender *Schnellnachweis der Splint-Kern-Grenze* bei Fichte und Tanne entwickelt: In Trichloräthylen oder Tetrachlorkohlenstoff wird soviel zerkleinertes Paraffin gegeben, daß es sich gerade noch auflöst. Außerdem wird als Lösung II eine gesättigte Lösung von *Kobalt-II-chlorid* in Isopropylalkohol hergestellt, so, daß noch ein Bodensatz übrigbleibt. Etwa 0,5—2 ml dieser Lösung II werden unter Umschütteln zu etwa 10 ml der Paraffin-Lösung gemischt. Diese fertige blaue Reagenzlösung wird auf eine Stammscheibe des zu untersuchenden Baumes oder Mastabschnittes mit einem Pinsel aufgetragen oder vorsichtig daraufgegossen. In kurzer Zeit ($\frac{1}{2}$ —3 Minuten) erscheint dann die *Splintholzzone farblos*, währenddem die Paraffinschicht auf dem *Kernholz zunächst blau* gefärbt bleibt. Erst nach längerer Zeit erfolgt auch hier der allmähliche Farbumschlag, wahrscheinlich unter gleichzeitiger Einwirkung der Luftfeuchtigkeit. Diese abgewandelte *Kobaltmethode* (STAHL 1894) beruht auf dem bekannten Farbumschlag des trocken blauen Kobaltchlorürs bei Befeuchtung, die im wasserreichen Splint schneller erfolgt als im relativ trockenen Kernholzbereich.

2. Unterschiede zwischen Früh- und Spätholz

Nach PHILLIPS (1933) unterscheiden sich Früh- und Spätholz neben vielem anderen auch in Form und Schließhautmechanismus der Hof-tüpfel: Die im Frühholz reichlich vorhandenen Tüpfel, mit zarten Tori, sind durchlässiger, werden jedoch bei der Austrocknung leichter verschlossen als die spärlicheren, aber gröberen Tüpfel des Spätholzes; bei künstlicher Trocknung wie natürlicher Verkernung schließen sich 90—100% der Frühholz-, dagegen nur 40—60% der Spätholztüpfel.

Es lockte, die Auswirkung solcher anatomischer Befunde im Filtrationsversuch zu prüfen. Die Möglichkeit, die Durchlässigkeit von Früh- und Spätholz getrennt zu bestimmen, boten so weitringig erwachsene Hölzer wie *Sequoia gigantea* und *Larix leptolepis* (vergleiche die getrennten Wichtebestimmungen für Früh- und Spätholz durch VINTILÄ 1939). Aus dem Splint- und Kernholz solcher Bäume wurden quadratische Prismen entnommen, welche nur Frühholz oder nur Spätholz enthielten. Mit viel Geschick und Verständnis hat daraus der Münchner Drechslermeister B. STEINBERGER Holzzylinder hergestellt, welche bei einem Durchmesser von nur 2—3 mm und einer Länge von 10—20 mm entweder nur aus Frühholz oder nur aus Spätholz bestanden. Nach der im Teil I, Seite 647, beschriebenen Methode wurden auch diese Proben mit Wasser gesättigt. Anschließend wurde die Durchlässigkeit für Wasser geprüft. Die im Teil I, Seite 648f., beschriebene Versuchsanordnung wurde dazu insoweit abgeändert, daß ein Schlauchsystem hergestellt wurde, welches durch Zwischenschalten von immer enger werdenden Glasrohrstückchen von einem Schlauchdurchmesser von 15 mm auf einen Durchmesser von nur 1—2 mm reduziert wurde. In dieses letzte enge Schlauchstück wurden die kleinen Holzzylinder eingesetzt, während

die Flüssigkeit unter geringem Druck daraus hervorströmte. Nur so konnte die gleichmäßige und luftblasenfreie Füllung dieses ganzen Schlauchsystems erreicht werden.

Diese Untersuchungen sind noch nicht abgeschlossen, doch scheinen die bereits vorliegenden Ergebnisse der Mitteilung wert: *Das Frühholz ist im Anfang 100mal wegsamer als das Spätholz; infolge Tüpfelverschluß sinkt aber die Durchlässigkeit des Frühholzes rasch auf rund 1% des Anfangswertes und liegt damit nur noch wenig über der Durchlässigkeit des Spätholzes.* Das von Anfang an schwer durchlässige Spätholz zeigt eine viel geringere Abnahme der Durchlässigkeit mit der Zeit: auf etwa 60% des Anfangswertes im Laufe von 6 Tagen (Abb. 1).

Sogar *Umkehrversuche* konnten mit diesen kleinen Probezylindern schon ausgeführt werden: Dabei stieg die Durchlässigkeit der Frühholzprobe von rund 1% des Anfangswertes nach der Umkehrung auf rund 11% der ursprünglichen Durchlässigkeit (also auf etwa das 11fache), während die Durchlässigkeit der Spätholzprobe von rund 10% des Ausgangswertes nach der Umkehrung auf etwa 80% (also auf das 8fache) anstieg.

3. Polarität der Durchlässigkeit?

Die Tracheiden werden im Baum vorwiegend in einer Richtung durchströmt: der „aufsteigende“ Saftstrom transportiert Wasser und Mineralstoffe von den Wurzeln zu den Blättern. „Rückläufige“ Strömungen kommen aber z. B. bei nächtlichem Regen vor und werden auch durch Farbstoffversuche nahegelegt, obwohl bei Verabreichung durch seitliche Bohrlöcher absteigende Färbung auch durch Störung der natürlichen Saugkraftverteilung erklärt werden kann.

Jedenfalls lag es nahe zu fragen, ob die anatomische Ausbildung der Leitungsbahnen auf die vorherrschende Durchströmung der Tracheiden ausgerichtet ist, oder ob Flüssigkeiten im Holz ebensogut in umgekehrter Richtung strömen können, ohne dabei größere Widerstände überwinden zu müssen. Diese Frage hatte schon PAPPENHEIM (1889) und STRASBURGER (1891) beschäftigt, ohne daß sie zu eindeutigen Antworten kommen konnten. Sie konnten nur angeben, daß mit den damals zur Verfügung stehenden Mitteln keine Durchlässigkeitsunterschiede in den beiden entgegengesetzten Richtungen festzustellen waren. In neuerer Zeit kam W. LIESE (1951b) bei Versuchen mit Teeröl zu dem gleichen Schluß, daß die axiale Orientierung des Holzes auf die Durchlässigkeit keinen Einfluß habe.

Inzwischen aber hat BANNAN (1956) über eine Polarität der fusiformen Initialen berichtet, bei denen er ein um 30% bevorzugtes Längenwachstum nach der Basis hin feststellen konnte. Außerdem wurde bei den eigenen Versuchen zum Teil beobachtet, daß bei mehrmalig wiederholten Umkehrversuchen die Spitzendurchlässigkeiten in beiden Richtungen ungleich schnell abklangen. Daraufhin wurde planmäßig auf allfällige polare Durchlässigkeitsunterschiede geachtet. Es ergaben sich aber weder bei aufeinanderfolgenden Versuchen mit demselben Klötzchen (Sukzedanversuche im Sinne MONTFORTS, 1932) noch bei Parallelversuchen mit quer durchschnittenen, sorgfältig halbierten Proben, welche nebeneinander normal oder invers durchströmt wurden (Simultan-Versuche), systematische Unterschiede. Etwaige polare Durchlässigkeitsunterschiede müßten also unter der Grenze der jetzigen Meßgenauigkeit (5—10%) liegen.

4. Verhalten von Laubhölzern

Angesichts der unerwartet reichhaltigen Problematik, welche die Untersuchung der axialen Durchlässigkeit der Nadelhölzer bot, wurde die Durchlässigkeit von Laubhölzern nur in orientierenden Versuchen geprüft. Die folgende Tabelle soll eine Vorstellung geben von der Größenordnung der bei verschiedenen Holzarten unter gleichem Druck (1 atm/m) gemessenen Filtrationsgeschwindigkeiten:

	cm/h
<i>Aristolochia macrophylla</i>	4000—4500
<i>Clematis vitalba</i>	3000—3500
<i>Robinia pseudacacia</i>	200—400
<i>Fagus sylvatica</i>	80—100
<i>Sambucus nigra</i>	30—35
<i>Pinus strobus</i>	20—30
<i>Larix decidua</i>	15—30
<i>Thuja spec.</i>	10—15
<i>Abies alba</i>	5—10

Im Gegensatz zu dieser guten axialen Durchlässigkeit der Laubhölzer steht deren schlechte Durchlässigkeit in radialer und tangentialer Richtung, welche nach den Ergebnissen von HARTMANN-DICK (1954) z. B. für Ahornholz (*Acer pseudoplatanus*) nur rund 10% der durchschnittlichen tangentialen und radialen Durchlässigkeit gleichdicker Nadelholzproben beträgt. Die Umrechnung von Angaben aus der Arbeit von HARTMANN-DICK ergab folgende Vergleichswerte für tangentiale und radiale Filtrationsgeschwindigkeiten (bei Anwendung eines durchschnittlichen Druckes von 500 atm/m):

	cm/h
<i>Pinus silvestris</i>	2—4
<i>Picea excelsa</i>	1—7
<i>Acer pseudoplatanus</i>	0,2—0,5

Wenn es sich in diesen beiden Tabellen auch nicht um dieselben Holzarten und Drucke handelt, sondern nur um einzelne Vertreter der Laub- und Nadelhölzer, so dürfen aus diesen Angaben doch wohl die folgenden allgemeinen Schlüsse bezüglich der größenordnungsmäßigen Durchlässigkeitsunterschiede gezogen werden:

Bei Nadelhölzern beträgt das Verhältnis der radialen und tangentialen Durchlässigkeit zur axialen etwa 1:1000—1:5000, bei zerstreutporigen Laubhölzern (Buche, Ahorn) hingegen etwa 1:100 000.

Gerade in letzter Zeit wurden durch elektronenmikroskopische Untersuchungen entscheidende Unterschiede zwischen dem Bau der Hof-tüpfel der Nadelhölzer und dem der intervasculären Hoftüpfel der Laubhölzer festgestellt: Die Tüpfel der Laubhölzer haben keine Tori, und die Schließhaut ist eine echte Membran mit Primärwandtextur (FREY-WYSSLING, MÜHLETHALER u. WYCKOFF 1948; EICKE 1957;

LIESE W. 1957). Es ist jedoch kaum anzunehmen, daß diese Unterschiede im Hoftüpfelbau für die sehr niedrige radiale und tangential Wegsamkeit der Laubhölzer verantwortlich zu machen sind; vielmehr wird wohl der hohe Anteil von Fasern und Parenchym beim Aufbau der Laubhölzer (HUBER u. PRÜTZ 1938) und die dadurch bedingte isolierte Stellung der einzelnen Gefäße der Grund für die sehr niedrige Querwegsamkeit der Laubhölzer sein.

Im allgemeinen war auch bei den Laubholzproben im Laufe der ersten Stunden eine Änderung (teilweise Zunahme, meist Abnahme) der Durchlässigkeit festzustellen, wie dies auch aus den Ergebnissen von I. SCHMIDT (1954) hervorging. Doch war im Umkehrversuch kein Anstieg der Durchlässigkeit zu beobachten. Daraus kann wohl geschlossen werden, daß die Durchlässigkeitsänderungen bei Laubholzproben durch Adsorptions- und Quellungsvorgänge hervorgerufen werden, nicht aber durch Auftreten von Tüpfelverschlüssen.

5. Chemische Beeinflußbarkeit der Wasserleitfähigkeit und des Hoftüpfelverschlusses

Über den Einfluß von Ionen sowie organischen Stoffen und Lösungsmitteln auf die Durchlässigkeit des Holzes liegen schon verschiedene Untersuchungen vor (JOHNSTON u. MAASS 1930, LIESE W. 1951a, SANDERMANN, SCHÄRFE u. FROEDE 1951, SCHMIDT I. 1954, HARTMANN-DICK 1955). Die Ergebnisse eigener Untersuchungen über die Durchlässigkeit für gelöste Stoffe und über deren Adsorption im Holz sollen, wie eingangs gesagt, erst in einer späteren Arbeit dargestellt werden. Hier sollen, des Zusammenhanges wegen, nur jene Versuche bereits jetzt vorläufig mitgeteilt werden, in welchen auf chemischem Wege der Hoftüpfelverschluß beeinflußt werden konnte.

a) **Alkohol.** Die Anwendung von Alkohol ist wohl eine der ältesten Methoden, im Experiment die Durchlässigkeit des Holzes zu beeinflussen (STRASBURGER 1891, GRIFFIN 1919, W. LIESE 1951a, SANDERMANN u. JONAS 1952, HARTMANN-DICK 1954). Im Anschluß an die Durchtränkung von Holzproben mit Alkohol nach verschiedenen Methoden konnte von allen Autoren übereinstimmend eine bessere Durchlässigkeit des Holzes für wäßrige und für ölige Holzschutzmittel erzielt werden.

Auch bei den eigenen Versuchen mit 94%igem Äthylalkohol, der mit Methylalkohol oder teilweise mit Benzol vergällt war, konnten diese Befunde bestätigt werden. Besonders bei Kernholz-, aber auch bei Splintholzproben zeigte sich schon im Laufe der ersten Stunden und, bis zu mehreren Tagen anhaltend, eine *Erhöhung der Durchlässigkeit* des Holzes für Alkohol, teilweise bis auf das Doppelte des Anfangswertes, worauf dann ein allmähliches Absinken der Durchlässigkeit bis auf 50% des Anfangswertes und darunter folgte (Abb. 2).

Bei *Umkehrversuchen* wurde auch hier ein „Umkehrereffekt“ beobachtet, der hier allerdings unregelmäßiger war als bei den Versuchen mit Wasser. Die Durchlässigkeit stieg dabei teilweise auf das 2–5fache des Endwertes vor der Umkehr an, was häufig 100–150% des Wertes zu Beginn der Versuche ausmachte. Das Maximum des Anstieges und der Übergang zu einem erneuten Absinken der Durchlässigkeit wurden hier, im Gegensatz zu den Versuchen mit reinem Wasser, erst nach 5–24 Stunden beobachtet.

Insgesamt scheint es sich bei den Einwirkungen des Alkohols auf das Holz wohl um drei verschiedene Vorgänge zu handeln:

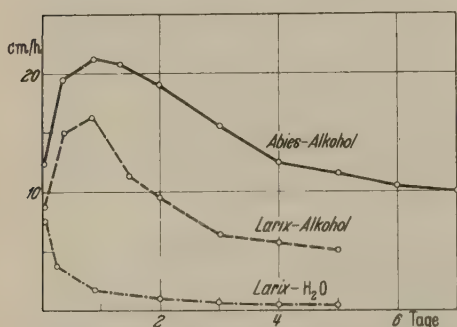


Abb. 2. Vergleich der absoluten Durchlässigkeit von Tannen- und Lärchensplintholz für Wasser und Alkohol: Erhöhung der Durchlässigkeit durch Alkohol

1. werden dabei wahrscheinlich Kittsubstanzen der bereits verklebten Hoftüpfel gelöst, ein Vorgang, der besonders bei den Kernholzproben eintritt.

2. wird es sich wohl, und zwar besonders bei den Splintholzproben, um eine Beeinflussung der Durchlässigkeit durch einen direkten chemischen Eingriff in den mikrochemischen Aufbau der Hoftüpfel-Schließhäute handeln. Es wurde festgestellt, daß gerade hier, ebenso wie in den Mittellamellen der

Zellwände, Lignin, amorphe Holzpolyosen (Pentosane, Hexosane) und Pektinstoffe gehäuft auftreten (BAILEY 1936, HÄGGLUND 1951, SANDERMANN 1956, FREY-WYSSLING, BOSSHARD u. MÜHLETHALER 1956). Das äußerte sich auch in dem besonderen färberischen Verhalten der Hoftüpfel-Schließhäute (HUBER u. MERZ 1958). Durch Alkohol können aber gerade Pentosane und Pektine in ihren kolloidchemischen Eigenschaften weitgehend verändert werden (SANDERMANN u. JONAS 1952).

3. wird wohl wegen der sehr niedrigen Oberflächenspannung des Alkohols (22 dyn/cm, im Gegensatz zu Wasser mit 73 dyn/cm) das Ansaugen der Tori an die Tüpfelhöfe verhindert. Dieser Einfluß des Alkohols ist zu beobachten, wenn frisches Splintholz mit Alkohol durchtränkt und erst anschließend der Trocknung unterworfen wird.

b) *Sublimat*. Besonders auffällig und bisher wohl nicht beschrieben ist der Einfluß von Sublimat-Lösungen auf die Durchlässigkeit von Nadelhölzern. Es wurden Konzentrationen von 10^{-3} , 10^{-4} und 10^{-5} durch verschiedene Nadelholzproben geschickt. Während bei den Durchlässigkeitsversuchen mit Wasser, je nach den angewendeten Drucken, schon nach wenigen Minuten oder spätestens nach ein bis zwei Stunden ein mehr oder weniger starker Abfall der Durchlässigkeit des Holzes als Folge des Hoftüpfelverschlusses eintritt, *verhindert Sublimat*

in ausreichender Konzentration die Bewegung der Hoftüpfelschließhäute offenbar vollständig. Wie bereits in der „Kurzen Originalmitteilung“ von HUBER u. MERZ (1956) mitgeteilt, wurde nämlich bei Anwendung der Sublimat-Konzentrationen von 10^{-3} und 10^{-4} kein merklicher Abfall der Durchlässigkeit beobachtet. Dieser betrug selbst nach Tagen und Wochen höchstens einige Prozent gegenüber dem Anfangswert. Sublimat in der Verdünnung von 1:100 000 dagegen nahm eine Mittelstellung zwischen reinem Wasser und den konzentrierteren Sublimat-Lösungen ein, d. h. ein Abfall der Durchlässigkeit um 10–50% im Laufe von Tagen bis Wochen wurde beobachtet (Abb. 3).

Bei den durchgeführten Umkehrversuchen war ebenfalls, wie zu erwarten, keine Änderung der Durchlässigkeit zu beobachten, soweit es sich um die Konzentrationen von 10^{-3} und 10^{-4} handelte.

Durch die Sublimat-Lösungen werden offenbar bestimmte Stoffe, wohl vor allem in den Haltefäden der Tori, fixiert, und dadurch wird der Torus straffer gespannt und in seiner Mittelstellung unbeweglich gemacht. Es handelt sich dabei ver-

mutlich um chemische und kolloidchemische Reaktionen vor allem des Lignins, das in den Hoftüpfel-Schließhäuten, ebenso wie in den Mittellamellen, offenbar besonders reichlich vorhanden sein muß (BAILEY 1936, SANDERMANN u. JONAS 1952, FREY-WYSSLING, BOSSHARD u. MÜHLETHALER 1956). Nach den Untersuchungen von SANDERMANN, FROEDE u. CASTEN (1951) wird aber wahrscheinlich das Sublimat im Holz gerade unter Auflösung der Äthylen-Doppelbindungen an die Seitenketten des Lignins bevorzugt angelagert.

c) Grenzflächenaktive Substanzen. Auch Wasser mit herabgesetzter Oberflächenspannung, sog. „entspanntes Wasser“, wurde für diese Versuche herangezogen. Es wurden dazu Lösungen von „Pril“-Pulver in den Konzentrationen 10^{-3} und 10^{-4} verwendet. Dieses im Haushalt heute vielfach verwendete Spülmittel enthält als wirksame Substanzen sog. „grenzflächenaktive Verbindungen“, und zwar eine Kombination von primären Alkylsulfaten und Alkylbenzolsulfonaten (KLING 1953). Durch diese Stoffe wird die Oberflächenspannung des Wassers, die normalerweise rund 70 dyn/cm beträgt, bei einer Konzentration von 10^{-4} auf ungefähr 50 dyn/cm herabgesetzt und bei einer Konzentration von 10^{-3} sogar auf weniger als 30 dyn/cm (KLING 1955). Dieser Wert

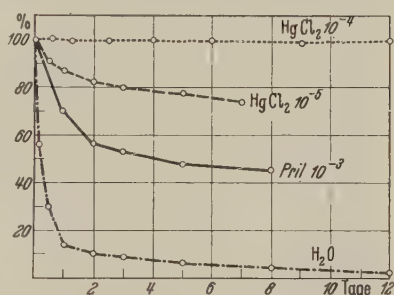


Abb. 3. Zeitlicher Verlauf der relativen Durchlässigkeit von Lärchensplintholz für Wasser-, Sublimat- und „Pril“-Lösungen: Verhinderung des Abfalls der Durchlässigkeit unter dem Einfluß der Chemikalien

liegt in der Größenordnung der Oberflächenspannung von Alkohol und Aceton und ist auf alle Fälle niedriger als der von LIESE (1953) berechnete Wert für die kritische Grenz-Oberflächenspannung (32—35 dyn/cm), unterhalb welcher die Tori der Hoftüpfel wegen der zu geringen Oberflächenspannung solcher Flüssigkeiten nicht mehr angesaugt werden können.

Die Befunde dieser Untersuchungen ähneln den mit sehr verdünnten Sublimat-Lösungen erhaltenen Ergebnissen: Mit Lösungen von „Pril“ in der Konzentration von 10^{-3} konnte bei Nadelholz der *Abfall der Durchlässigkeit weitgehend verhindert* werden, wenn auch nicht so eindeutig und regelmäßig wie mit Sublimat (Abb. 3).

Nach Untersuchungen von THEDEN u. SCHULZE (1943) war die Verwendung von Netzmitteln, allerdings bei Tauch- und Anstrichversuchen, ohne Einfluß auf Eindringtiefe und -geschwindigkeit. Das ist durchaus verständlich und steht nicht im Widerspruch zu unseren Befunden. Bei den Tauch- und Anstrichversuchen wird die Eindringung ja nur durch Diffusion erzielt; dabei können aber in die Capillaren des Holzes Flüssigkeiten mit höherer Oberflächenspannung sogar weiter und schneller eindringen als Flüssigkeiten mit niedrigerer Oberflächenspannung. Also ist hier gewöhnliches Wasser gegenüber „entspanntem“ Wasser sogar im Vorteil, wenn man von dem Vorzug der Verbesserung der Benetzbarkeit rauher oder verschmutzter Oberflächen durch „entspanntes“ Wasser absieht.

6. Bedeutung der Ergebnisse für die Praxis

Mehrere der im Rahmen dieser Laborversuche gefundenen Ergebnisse, über die hier und im Teil I berichtet wurde, dürften auch für die Praxis des Holzschutzes sofort von Bedeutung sein oder sich doch nach einigen weiteren, größer angelegten Versuchen gut verwerten lassen.

Als erstes soll hier auf die Bedeutung der aus den Umkehrversuchen gewonnenen Erkenntnisse über die *reversiblen Hoftüpfelverschlüsse*, über die wir im Teil I ausführlich berichteten, hingewiesen werden (HUBER u. MERZ 1958). Diese Tatsachen könnten einerseits zu einer Abkürzung der langen Tränkzeiten führen, wie sie besonders beim Original-Boucherie-Verfahren, aber auch noch bei den verbesserten axialen Tränkverfahren in Kauf genommen werden müssen (MAHLKE, TROSCHEL u. J. LIESE 1950, GEWECKE 1957). Andererseits könnte dies vielleicht der Weg sein, um die bisher nur schwer imprägnierbaren Fichten- und Tannenmaste überhaupt einer gleichmäßigen Durchtränkung zugänglich zu machen.

Unabhängig von unseren Versuchen wurden auf diesem Gebiet, offenbar schon seit mehreren Jahren, von HENRIKSSON (1954) bei der Bolidens Gruvaktiebolag in Schweden Versuche durchgeführt, um ein verbessertes Verfahren für die Tränkung von Masten zu entwickeln.

Dabei sollen die Störungen eines eventuellen Tüpfelverschlusses dadurch umgangen oder schon verschlossene Tüpfel vielleicht dadurch wieder geöffnet werden, daß die Druckphase jeweils nur kurze Zeit (2—5 Minuten) andauert, und daß dann auf das Holz während einer noch kürzeren Zeitdauer (1—3 Minuten) ein Vakuum einwirkt. Dadurch wird zwar aus den Masten wieder ein Teil der eingebrachten Tränkflüssigkeit herausgesaugt, doch wird dadurch gleichzeitig einer Verlagerung der Tori in den Hoftüpfeln entgegengewirkt und beginnender Hoftüpfelverschluß wieder rückgängig gemacht. Anschließend folgt eine neuerliche Druckphase und wieder eine Vakuumphase und so fort: „*Wechseldruckmethode*“! Trotz des durch die Vakuumphase entstehenden Zeitverlustes soll die Imprägnierung, insbesondere von Tannen- und Fichtenmasten, nach diesem neuen, seit kurzem in Deutschland patentierten Verfahren (HENRIKSSON 1957) schneller vor sich gehen als nach den Verfahren mit Anwendung konstanten Druckes.

Diese Messungen aus der Praxis decken sich gut mit unseren eigenen, an Probezylindern gewonnenen Ergebnissen, soweit es sich dabei um die reversiblen Verlagerungen der Tori im Splintholz handelt. Es erscheint daher durchaus möglich, daß dieses neue Verfahren verschiedene bisher vorhandene Schwierigkeiten überwinden könnte. Wenn die Erfolge in der Praxis den Ergebnissen bei der Entwicklung des Verfahrens entsprechen, so dürfte es wegen der Zeitersparnis und der besser gesicherten und gleichmäßigeren Imprägnierung von bisher schwer imprägnierbaren Hölzern lohnend sein, bestehende Anlagen, trotz des Kostenaufwandes, auf das neue Verfahren umzustellen.

Zweitens sei hier auf die praktische Bedeutung der Möglichkeiten zur *Verhinderung des Tüpfelverschlusses durch chemische Einflüsse* hingewiesen. Die längst bekannten Wirkungen des Alkohols auf das Holz konnten wegen der Unwirtschaftlichkeit keinen Eingang in die Praxis finden. Wenn man aber mit Netzmitteln oder noch besser mit sehr verdünnten Sublimat-Lösungen das Schließen der Tüpfel verhindern kann, so sollte dieses Verfahren sehr bald praktisch anwendbar sein: *Sublimat-Vorfixierung*. Es müßte dazu eine doppelte Trängung ausgeführt werden: Beim ersten Tränkvorgang würde das Holz in saftfrischem Zustande, also entweder am stehenden Baum (PLANKL 1955) oder spätestens ein bis zwei Wochen nach der Fällung, mit einer Netzmittel-Lösung oder mit sehr verdünnten Sublimat-Lösungen nach einem der axialen Tränkverfahren getränkt werden. Entweder unmittelbar anschließend oder nach einer entsprechenden Lagerzeit könnte dann die Einbringung der nötigen Mengen von U- oder UA-Salzen erfolgen, welche wesentlich billiger sind als das Sublimat. Durch den ersten Tränkvorgang soll dabei der bei der Trocknung normalerweise eintretende Hoftüpfelverschluß verhindert werden, was besonders bei Fichten- und

Tannenholz eine gleichmäßigere Durchtränkung ermöglichen sollte. Andererseits könnten durch das Sublimat die Hoftüpfelschließhäute sogar derart fixiert werden, daß sie auch bei einem anschließenden axialen Tränkvorgang mit U- oder UA-Salzen nicht durch den axialen Druck verschlossen werden können; dadurch sollte eine Verkürzung der Tränkzeiten zu erreichen sein. Inwieweit auf diesem geschilderten Wege Fichten- und Tannenholz sogar einer befriedigenden Tränkung mit Teeröl zugänglich gemacht werden könnten, kann hier noch nicht abgeschätzt werden. Die genannten Vorteile sollten aber auf alle Fälle die mit dem Vorschlag verbundenen Nachteile des doppelten Tränkvorganges und die Ausgaben für das Fixationsmittel (Sublimat, Netzmittel usw.) völlig aufwiegen, weil durch dieses Verfahren gewisse Tränkungen vielleicht überhaupt erst möglich gemacht werden.

Schließlich sei noch auf die auf S. 661f. beschriebene *Kobaltmethode zur Erkennung der Splint-Kern-Grenze bei Fichten- und Tannenholz* hingewiesen. Eine einfache Reagenzlösung, welche in der Hauptsache blaues, wasserfreies Kobalt-II-chlorid in gleichmäßiger Verteilung in Paraffin enthält, wird dabei auf die zu untersuchenden Stammscheiben gebracht, wobei das stark wasserhaltige Splintholz die blaue Reagenzmasse schnell entfärbt. Dadurch tritt der Bereich des Kernholzes deutlich blau gefärbt gegenüber dem farblosen Splintholz hervor.

Zusammenfassung

1. Die in der I. Mitteilung besprochenen Effekte (Rückgang der axialen Wasserleitfähigkeit infolge Hoftüpfelverschlusses und Umkehr-effekt) sind im Frühholz mit seinen beweglicheren Schließhäuten stärker als im Spätholz; sie verschwinden selbst im Kernholz, trotz einer auf $\frac{1}{1000}$ — $\frac{1}{10000}$ gesunkenen Leitfähigkeit, nicht ganz. Sie fehlen dagegen den geprüften Laubhölzern, deren Hoftüpfel auch keine Tori besitzen.

2. Behandlung der Proben mit Alkohol oder Netzmitteln erschwert das Spiel der Hoftüpfel; vor allem aber fixiert Sublimat bereits in Konzentrationen von 10^{-3} bis 10^{-4} die Tüpfelschließhäute und verhindert die beschriebenen Effekte. Daraus ergeben sich Vorschläge für eine verbesserte Tränktechnik (Wechseldruckverfahren, Sublimat-Vorfixierung).

Literatur.

- BAILEY, I. W.: Lignin in Douglas fir. I. Composition of the Middle Lamella. II. The Pentosan Content of the Middle Lamella. Ind. Engng. Chem., Analyt. Edit. 8, 52—55, 389—391 (1936). — BANNAN, M. W.: Some aspects of the elongation of fusiform cambial cells in *Thuja occidentalis* L. Canad. J. Bot. 34, 175—196 (1956). — EICKE, R.: Elektronenmikroskopische Untersuchungen an Gymnospermenhölzern als Beitrag zur Phylogenie der Gnetales. Bot. Jb. 77, 193—217 (1957). — ERDTMAN, H.: Zur Kenntnis der Extraktivstoffe des Kiefernkernholzes. Naturwissenschaften 27, 130—131 (1939a). — Die phenolischen Inhalts-

stoffe des Kiefernkerholzes, ihre physiologische Bedeutung und hemmende Einwirkung auf die normale Aufschließbarkeit des Kiefernkerholzes nach dem Sulfitverfahren. Justus Liebigs Ann. Chem. **539**, 116—127 (1939b). — FREY-WYSSLING, A., K. MÜHLETHALER u. R. W. G. WYCKOFF: Mikrofibrillenbau der pflanzlichen Zellwände. *Experientia* (Basel) **4**, 475—476 (1948). — FREY-WYSSLING, A., H. H. BOSSHARD u. K. MÜHLETHALER: Die submikroskopische Entwicklung der Hoftüpfel. *Planta* (Berl.) **47**, 115—126 (1956). — GEWECKE, H.: Die Frischimprägnierung von Masten aus Fichten- und Tannenholz nach dem Saftverdrängungsverfahren. *Holz als Roh- und Werkstoff* **15**, 119—124 (1957). — GRIFFIN, G. J.: Bordered pits in Douglas fir. a study of the position of the torus in mountain and lowland specimens in relation to creosote penetration. *J. Forestry* **17**, 813—822 (1919). — HÄGGLUND, E.: *Chemistry of Wood*. New York 1951. — HARTMANN-DICK, U.: Untersuchungen über die Durchlässigkeit des Holzes bei der Druckfiltration. I. Durchlässigkeit für Wasser. *Forstwiss. Cbl.* **73**, 40—63 (1954). — II. Durchlässigkeit für Lösungen verschiedener Art. *Forstwiss. Cbl.* **74**, 163—183 (1955). — HENRIKSSON, St. T.: Holztränkung nach der Wechseldruckmethode. *Holz als Roh- u. Werkstoff* **12**, 233—241 (1954). — Verfahren und Vorrichtung zum Imprägnieren von Holz. DRP Nr 967212 vom 10. Okt. 1957. — HUBER, B., u. G. PRÜTZ: Über den Anteil von Fasern, Gefäßen und Parenchym am Aufbau verschiedener Hölzer. *Holz als Roh- u. Werkstoff* **1**, 377—381 (1938). — HUBER, B., u. W. MERZ: Über die Wirkung des Hoftüpfelverschlusses auf die Wasserleitfähigkeit von Nadelhölzern. *Naturwissenschaften* **43**, 114 (1956). — Über die Bedeutung des Hoftüpfelverschlusses für die axiale Wasserleitfähigkeit von Nadelhölzern. I. Grunderscheinungen. *Planta* (Berl.) **52** (1958). — JOHNSTON, H. W., and O. MAASS: Penetration studies. The path of liquid penetration in Jack pine. *Canad. J. Res.* **3**, 140—173 (1930). — KLING, W.: Wasserlösliche grenzflächenaktive Stoffe. *Angew. Chem.* **65**, 201—212 (1953). — Theorie des Waschens. *Z. Elektrochem.* **59**, 260—270 (1955). — KOCH, J. E., u. W. KRIEG: Neues Verfahren zur Unterscheidung von Kern und Splint im Kiefernholz. *Chemiker-Ztg.* **15**, 140—141 (1938). — KOLLMANN, F.: Über die physikalische und technologische Bedeutung der Kernstoffe des Holzes. *IUFRO: Compt. Rend. 11. Congr. Rome 1953*, 1045—1056, Firenze 1954. — LIESE, J.: *Holzschutz*. Herausgeg. von W. LIESE. Berlin 1954. — LIESE, W.: Über die Eindringung von öligen Schutzmitteln in Fichtenholz. *Holz als Roh- und Werkstoff* **9**, 374—378 (1951a). — Über den Einfluß physikalischer Eigenschaften öliger Schutzmittel auf die Eindringung in Holz. *Bitumen, Teere, Asphalte, Pech u. verw. Stoffe* **2**, 276—279 (1951b). — Über die Hoftüpfel der Coniferen. *Ber. dtsch. bot. Ges.* **66**, 203—211 (1953). — Der Feinbau der Hoftüpfel bei den Laubhölzern. *Holz als Roh- u. Werkstoff* **15**, 449—453 (1957). — MAHLKE, F., E. TROSCHEL u. J. LIESE: *Handbuch der Holzkonservierung*, 3. Aufl. Berlin 1950. — MONTFORT, C.: *Methodologie kausaler Fragestellungen und des physiologischen Experimentes in der vergleichenden Ökologie und experimentellen Pflanzengeographie*. In *Abderhaldens Handbuch der biologischen Arbeitsmethoden*, Bd. XI, Teil 6, S. 267—334. 1932. — PAPPENHEIM, K.: Zur Frage der Verschlufähigkeit der Hoftüpfel im Splintholz. *Ber. dtsch. bot. Ges.* **7**, 2—19 (1889). — PHILLIPS, E. W. J.: Movement of the pit membrane in coniferous woods, with special reference to preservative treatment. *Forestry* **7**, 109—120 (1933). — PLANKL, L.: Der jahreszeitliche Verlauf der Transpiration als Grundlage der Lebendtränkung von Waldbäumen. *Diss. München* 1955. — RENNERFELT, E.: Undersönkingar över toxiciteten emot rötswampar hos tallkärnvedens fenoliska beståndsdelar (Untersuchungen über die Toxicität der phenolischen Inhaltsstoffe des Kiefernkerholzes gegenüber Fäulnispilzen). *Medd. Stat. Skogsforskn. Anst.* **33**, 331—364 (1944). — SANDERMANN, W.: *Grundlagen der Chemie und Chemischen Technologie des Holzes*. Leipzig 1956. —

SANDERMANN, W., O. FROEDE u. R. CASTEN: Über den Mechanismus der Sublimierung an der Holzfaser. Holz als Roh- u. Werkstoff **9**, 456—460 (1951). — SANDERMANN, W., u. G.-Z. JONAS: Über die Imprägnierung von Hölzern mit ölige Schutzmitteln, unter besonderer Berücksichtigung der Fichte. Holz als Roh- u. Werkstoff **10**, 305—311 (1952). — SANDERMANN, W., E. SCHÄRFE u. O. FROEDE: Über die Eindringtiefe des Sublimats bei einfacher und verbesserter Kyanisierung. Holz als Roh- u. Werkstoff **9**, 186—190 (1951). — SCHMIDT, I.: Über die Durchlässigkeit von Buchenstammholz für Wasser und Elektrolyte. Zulassungsarbeit München 1954. — STAHL, E.: Einige Versuche über Transpiration und Assimilation. Bot. Ztg. **52**, 117—146 (1/1894). — STRASBURGER, E.: Histologische Beiträge. Heft III: Über den Bau und die Verrichtungen der Leitungsbahnen in den Pflanzen. Jena 1891. — THEDEN, G., u. B. SCHULZE: Untersuchungen über die Bedeutung von Netzmitteln für die Schutzbehandlung von Holz mit wäßrigen Lösungen. Holz als Roh- u. Werkstoff **6**, 241—245 (1943). — TRENDLENBURG, R.: Das Holz als Rohstoff, 2. Aufl., neubearbeitet von W. MAYER-WEGELIN. München 1955. — VINTILĂ, EU.: Untersuchungen über das Raumgewicht und Schwindmaß von Früh- und Spätholz bei Nadelhölzern. Holz als Roh- u. Werkstoff **2**, 345—357 (1939).

Prof. Dr. BRUNO HUBER und Dr. WALTER MERZ
Forstbotanisches Institut, München 13, Amalienstraße 52

Lebenslauf

Am 15. Februar 1927 wurde ich, Walter Max Merz, als Sohn des Maurerpoliers Emil Merz und seiner Ehefrau Ida, geb. Fuchs, in Wernersreuth, Kreis Asch (Sudetenland) geboren. Hier besuchte ich von 1933 bis 1938 die Volksschule, und von 1938 bis 1944 die Oberschule für Jungen in Asch.

Am Ende der 6. Oberschulkasse wurde ich zum Arbeitsdienst eingezogen und kam anschließend zur Wehrmacht und zum Fronteinsatz. Erst nach einer fast dreijährigen Kriegsgefangenschaft konnte ich zu meinen Eltern zurückkehren. Diese hatten inzwischen durch die Vertreibung alles verloren und in Niederbayern zunächst eine neue Heimat gefunden.

Ab 1948 besuchte ich die Oberrealschule in Deggendorf/Donau und legte dort im Juli 1949 mein Abitur ab. Als bestem Abiturienten unserer Schule wurde mir vom Bayerischen Staatsministerium für Unterricht und Kultus das „Stipendium für besonders Begabte“ gewährt.

Im Wintersemester 1949/50 begann ich an der Ludwig-Maximilians-Universität in München das Studium der Naturwissenschaften. Nach zweimaliger Unterbrechung wegen Krankheit, Folgen der Kriegsgefangenschaft, kam ich als Werkstudent in eine Firma für Holzimprägnierung.

Diese Tätigkeit führte mich zu dem Thema meiner Dissertation, die ich in den Jahren 1954 bis 1957 im Institut für Forstbotanik unter Anleitung von Herrn Prof. Dr. B. Huber erstellte. Hier war ich in den letzten Jahren auch als wissenschaftliche Hilfskraft aus Mitteln der Deutschen Forschungsgemeinschaft angestellt.

